

Approved For Release STAT  
2009/08/31 :  
CIA-RDP88-00904R000100130

Dec 1988

Approved For Release  
2009/08/31 :  
CIA-RDP88-00904R000100130



**Вторая Международная Конференция  
Организации Объединенных Наций  
по применению атомной энергии  
в мирных целях**

A/CONF/15/P/2307  
USR  
ORIGINAL: RUSSIAN

Не подлежит официальному сообщению на Конференции

**"ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НА СТРУКТУРУ  
И СВОЙСТВА УРАНА".**

Сергеев Г.Я., Титова В.В., Николаева З.П.,  
Каптельцев А.М., Колоснева Л.И.

**ВВЕДЕНИЕ**

Изделия из урана работают в атомных реакторах при повышенных температурах в условиях сложного напряженного состояния. Поэтому изучение структуры и свойств урана в связи с условиями эксплуатации в реакторах стоит в ряду центральных проблем атомной энергетики.

В литом состоянии или после пластической деформации в  $\gamma$ -области уран крупновернист, сравнительно тверд и при этом имеет невысокую прочность (предел прочности порядка 30-35 кг/мм<sup>2</sup>) и малую пластичность (удлинение - 5%). Кроме того,  $\alpha$ -уран обладает ярко выраженной анизотропией физических и механических свойств. Изделиям из урана свойственно формоизменение под воздействием облучения.

В связи с этим решение проблемы повышения срока службы изделий в реакторах связано с решением задачи изменения строения и свойств урана в нужном направлении.

Как известно, основными путями изменения строения и свойств чистых металлов являются: термическая обработка, деформация с последующим рекристаллизационным отжигом, легирование. Все эти методы обычно применяются и к урану.

- 2 -

Ниже излагаются некоторые результаты исследования изменения структуры и механических свойств литого или горячекатаного урана путём термической обработки (закалки), а также путем деформации и отжига при температурах  $\alpha$  - области.

### I. СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИТОГО И ГОРЯЧЕКАТАНОГО УРАНА

Зерна литого или горячекатаного урана размером 1,5-2 мм состоят из субзерен размером 200-500 микрон (рис 4а). Отличие в кристаллографической ориентировке субзерен не превышает 5-10°.

Механические свойства урана различных плавок, определенные при кратковременных испытаниях на растяжение в диапазоне температур 20-850°, иллюстрирует рис I. Испытывались стандартные цилиндрические образцы: диаметр рабочей части 5 мм; длина рабочей части 25 мм. Широкий диапазон изменения предела прочности и удлинения связан с колебанием содержания кримесей в металле исследованных плавок.

С повышением температуры в  $\alpha$  - области от 20° до 670° прочность падает при одновременном возрастании пластичности. Следует отметить неоднократно наблюдавшееся аномальное изменение характеристик прочности урана в температурном интервале 20-100°C. Значения предела прочности с изменением температуры от 20° до 100° увеличиваются, в то время как значения предела текучести уменьшаются.

С переходом в область температур  $\beta$  - фазы наблюдается возрастание предела прочности и уменьшение пластичности. С переходом в  $\gamma$  - область имеет место разкое падение прочности и возрастание пластичности.

При длительной пребывании в нейтронном поле изделия из урана испытывают деформацию под воздействием напряжений, возникших благодаря наличию в них температурного градиента и последствие образования термических ников в результате актов деления.

64-80

- 8 -

В связи с этим определенный интерес представляло исследование ползучести урана в зависимости от состояния материала и условий испытания.

Ползучесть литьего и горячекатаного урана была исследована в температурном диапазоне 20-600° при различных напряжениях. Продолжительность испытаний соответствовала 700-1000 часов при повышенных температурах и до 600 часов при комнатной температуре. При повышенных температурах ползучесть исследовалась в атмосфере очищенного гелия. Применялись стандартные цилиндрические образцы: диаметр рабочей части  $10 \pm 0,05$  мм; длина рабочей части 100 мм.

В таблице I приведены результаты отдельных испытаний на ползучесть, а на рис 2 показана зависимость скорости ползучести горячекатаного урана от напряжений при температурах 20-600°C. Скорость ползучести урана резко возрастает с повышением температуры, особенно при температурах, превышающих 400°.

#### П. ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УРАНА ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ.

В наших исследованиях основным видом термической обработки урана являлась операция, условно называемая закалкой. Она осуществлялась путем нагрева металла до температур  $\beta-$  или  $\gamma$ -фаз с последующим быстрым охлаждением в воде или масле. В этом случае термин "закалка" следует считать условным в связи с тем, что при такой термической обработке урана обычной чистоты не происходит фиксирования при комнатной температуре ни высокотемпературных, ни промежуточных фаз.

Однако закалка приводит к резкому изменению структуры и свойств урана.

Определялась зависимость механических свойств от условий закалки (температуры нагрева, скорости охлаждения), а также стабильность свойств закаленного металла при нагреве.

Таблица I.  
**Сопротивляемость урана ползучести в зависимости от температуры и напряжений.**

| Темпера-<br>тура испыта-<br>ния, °C | Напряже-<br>ние, кг/мм <sup>2</sup> | Деформация<br>в момент на-<br>гружения | Скорость<br>ползучес-<br>ти, %/ час | Межервал<br>зашеда-<br>скорости<br>ползучес-<br>ти, час | Суммарная дефор-<br>мация ползучес-<br>ти за<br>час | Громче-<br>ние: | Образец<br>не разор-<br>вался |
|-------------------------------------|-------------------------------------|--|-------------------------------------|---|---|-----------------|-------------------------------|
| 20                                  | 25                                  | 0,70                                   | 2,3.10 <sup>-5</sup>                | 1100-3300   | 3300  | 1,12            |                               |
| 100                                 | 20                                  | 0,68                                   | 7,3.10 <sup>-5</sup>                | 560-1050  | 1050  | 1,28            | -"                            |
| 200                                 | 18                                  | 0,49                                   | 2,7.10 <sup>-5</sup>                | 360-820   | 820   | 0,63            | "                             |
| 300                                 | 18                                  | 0,58                                   | 1,0.10 <sup>-4</sup>                | 200-815   | 815   | 0,81            | "                             |
| 400                                 | 10                                  | 0,15                                   | 6,1.10 <sup>-4</sup>                | 300-735   | 735   | 0,70            | -"                            |
| 500                                 | 3                                   | 0,05                                   | 1,1.10 <sup>-3</sup>                | 275-750   | 750   | 1,05            | "                             |
| 600                                 | 1                                   | 0,02                                   | 2,0.10 <sup>-3</sup>                | 25-150  | 850   | 3,15            | -"                            |

- 5 -

## I. Изменение механических свойств урана в зависимости от условий закалки.

Закалка с температур  $\beta$ -и  $\gamma$  - фаз приводит к резкому изменению структуры металла и значительному повышению прочностных характеристик, определенных как при кратковременных (рис 3), так и при длительных испытаниях в соответствующем диапазоне температур. Наибольшее изменение пределов прочности и текучести наблюдается после закалки из  $\gamma$  - области (примерно на 60% при комнатной температуре). Характеристики пластичности при этом изменяются мало.

Рис. 4 иллюстрирует изменение структуры урана при закалке. Наблюдается значительное измельчение зерна урана, причем степень измельчения зерна, так же как и прочностные характеристики закаленного урана, зависит от химического состава металла и соотношения примесей, в первую очередь таких, как железо, кремний, никель и алюминий (рис. 5 и 6).

Было установлено, что скорость охлаждения в процессе закалки оказывает существенное влияние на свойства закаленного металла. Рис. 7 иллюстрирует изменение свойств литого урана, закаленного из  $\gamma$  - области в воде, температура которой изменялась от 20° до 100°С.

Аналогично изменяются механические свойства и при закалке в различные охлаждающие среды. Так, горячекатанный уран, имеющий предел прочности 38 кг/мм<sup>2</sup>, после закалки с 950° (выдержка 30 минут) в воде показал значение предела прочности равное 64 кг/мм<sup>2</sup>, после закалки в масле - 45 кг/мм<sup>2</sup> и после закалки в токе аргона - 40 кг/мм<sup>2</sup>.

## 2. Изменение механических свойств закаленного урана при нагреве.

Для урана, закаленного из  $\beta$  - и  $\gamma$  - областей значения характеристик прочности с повышением температуры постепенно сни-

- 6 -

жаются, оставаясь, однако, при всех температурах  $\alpha$  - области большими, чем те же характеристики при соответствующих температурах для незакаленного урана (рис 8).

Результаты испытаний закаленного урана на ползучесть позволили установить, что закалка из  $\beta$ - и  $\gamma$ - областей повышает сопротивляемость урана ползучести при температурах меньших  $400^{\circ}$  и уменьшает ее при более высоких температурах по сравнению с сопротивляемостью ползучести литого или горячекатаного металла (см.табл.2).

На рис.9 приведены первичные кривые ползучести, полученные при  $300^{\circ}$ (а) и  $500^{\circ}$ (б) для горячекатаного и закаленного из  $\beta$ - и  $\gamma$  - областей урана, а на рис.10 показано изменение скорости ползучести в зависимости от напряжения при  $500^{\circ}$  для горячекатаного урана и урана той же плавки, закаленного из  $\beta$  - и  $\gamma$  - фаз.

При температурах, превышающих  $300^{\circ}$ , в процессе деформации урана значительную роль начинает играть течение по границам зерен. В связи с этим деформация мелкокристаллического закаленного металла с большой поверхностью границ протекает значительно легче, чем деформация крупнокристаллического литого или горячекатаного урана. При низких температурах, когда, как известно, деформация в основном осуществляется путем двойникования (I), упрочненный закалкой мелкокристаллический уран обладает значительно большей сопротивляемостью деформации.

Меньшая сопротивляемость ползучести при  $400^{\circ}$  закаленного урана по сравнению с незакаленным отмечена и в работе (2).

Было установлено, что закалка повышает на  $30-40^{\circ}$  температурный интервал, в котором наблюдается резкое ускорение ползучести. Так, для горячекатаного урана область начала ускоренной ползучести находится в интервале температур  $300-350^{\circ}$ , а для закаленного -  $350-375^{\circ}\text{C}$  (рис I8).

На рис.II приведен график изменения механических свойств закаленного урана в зависимости от температуры отпуска.

2840-60

2849-60

Таблица 2.

Ползучесть закаленного Урана в зависимости от температуры испытания и нагружения.

| Темп.<br>ратура<br>испы-<br>тания<br>°С               | Состояние;<br>термическая<br>обработка | Напря-<br>жение <sup>2</sup><br>кг/мм <sup>2</sup> | Метор-<br>изация<br>в момент<br>нагруже-<br>ния σ <sub>0</sub><br>(G) | Скорость<br>ползу -<br>щести<br>У <sub>0</sub> /час | Интервал<br>замера<br>скорости<br>ползучес-<br>ти (час) | Суммарная де-<br>формация пол-<br>зучести<br>ε <sub>0</sub> (час) | Прине-<br>чение<br>занче- | Сообраз<br>я с |   |   |
|---|--|--|---|---|---|---|---------------------------|----------------|---|---|
|   |  |  |   |   |   |   |                           | 1              | 2 | 3 |
| Горячека-<br>танный                                   |  |  |   |   |   |   |                           |                |   |   |
| 18  |  | 0,58   |   | 1,0.10 <sup>-4</sup>                                | 200-615   | 815   | 0,81                      | Сообраз<br>я с |   |   |
| Горячека-<br>танный, зака-<br>ленный из γ-<br>области |  |  |   |   |   |   |                           |                |   |   |
| 20  |  | 0,08   |   | 2,5.10 <sup>-5</sup>                                | 90-300  | 300   | 0,17                      | Сообраз<br>я с |   |   |
|   |  | 0,29   |   | 6,5.10 <sup>-5</sup>                                | 125-525   | 525   | 0,46                      | Сообраз<br>я с |   |   |
| Литой   |  |  |   |   |   |   |                           |                |   |   |
| 20  |  | 2,00   |   | 2,3.10 <sup>-4</sup>                                | 235-475   | 300   | 2,83                      | Сообраз<br>я с |   |   |
| Литой, зака-<br>ленный из γ-<br>области               |  |  |   |   |   |   |                           |                |   |   |
| 20  |  | 0,26   |   | 6,0.10 <sup>-5</sup>                                | IIC-420   | 500   | 0,36                      | Сообраз<br>я с |   |   |

Прод.табл.2.

| I   | 2 | 3    | 4                   | 5      | 6   | 7                 | 8                                  | 9 |
|---|---|------|---------------------|--------|-----|-------------------|------------------------------------|---|
| Горячекатаный   | 4 | 0,04 | $3,5 \cdot 10^{-3}$ | 75-500 | 745 | 2,80              | образец<br>не раз-<br>орвал-<br>ся |   |
| Горячеката-<br>танный, зака-<br>ленный из І-<br>области | 4 | 0,08 | $1,3 \cdot 10^{-2}$ | 50-175 | 735 | $\delta = 26,7\%$ | разо-<br>рвал-<br>ся               |   |
| Литой   | 4 | 0,04 | $1,3 \cdot 10^{-3}$ | 40-520 | 520 | 0,87              | образец<br>не разо-<br>рвался      |   |
| Литой, зака-<br>ленный из<br>І-области                  | 4 | 0,05 | $7,3 \cdot 10^{-3}$ | 40-340 | 520 | 4,92              | -"                                 |   |

- 9 -

Закаленный уран сохраняет высокие значения пределов прочности и текучести после отпуска при температурах  $\alpha$  - области и лишь после нагрева при температурах  $\beta$  - фазы наблюдается резкое падение значений характеристик прочности.

III. ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УРАНА МЕТОДОМ ДЕФОРМАЦИИ И ПОСЛЕДУЮЩЕГО РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИОННОГО ОТЖИГА ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ  $\alpha$  - ОБЛАСТИ.

I. Изменение структуры урана в процессе деформации и рекристаллизации.

В результате исследования микроструктуры деформированного и отожженного при температурах  $\alpha$  - области урана были определены основные параметры рекристаллизации и построены приближенные диаграммы рекристаллизации для металла различной чистоты. Одна из таких диаграмм приведена на рис. I2. Она характеризует изменение величины рекристаллизованного зерна в зависимости от степени деформации и температуры отжига.

Температура начала рекристаллизации для урана соответствует  $370-430^{\circ}$ , температура полной рекристаллизации -  $450-625^{\circ}$  (в зависимости от степени деформации). Критическая степень деформации меньше 5%. Интенсивная собирательная рекристаллизация наблюдается при  $625-650^{\circ}$ . Эти данные в основном согласуются с имеющимися литературными данными (3).

Путем деформации и отжига крупнокристаллическая структура литого или горячекатаного урана может быть превращена в мелко-кристаллическую с однородным по величине зерном размером 20-30 микрон (рис. I4).

Течение процессов рекристаллизации, как известно, сильно зависит от содержания в металле примесей и легирующих элементов. Имеются указания о существенном влиянии примесей на рекристаллизацию урана (3). Однако сколько-нибудь подробные сведения по

- 10 -

этому вопросу в литературе отсутствуют.

На рис. I3 представлена диаграмма рекристаллизации сплава урана с 0,1 вес % молибдена. Сравнение этой диаграммы с диаграммой рекристаллизации чистого урана свидетельствует о том, что указанное количество молибдена в значительной степени тормозит рекристаллизацию урана.

## 2. Механические свойства урана, подвергнутого деформации и отжигу при температурах $\alpha$ -области.

Графики рис. I5-а, б, иллюстрируют изменение механических свойств урана, определенных при кратковременных испытаниях на растяжение, в зависимости от степени деформации при прокатке.

Приведенные данные показывают, что с увеличением степени деформации значительно возрастают характеристики прочности. Так, предел прочности горячекатаного урана, служившего исходным материалом при прокатке, был равен  $40,6 \text{ кг}/\text{мм}^2$ , а прокатанного при  $500^\circ$  с обжатием 50%—70,8  $\text{кг}/\text{мм}^2$ , т.е. возрос на 74%.

При этом характеристики пластичности почти не изменились.

Рекристаллизационный отжиг приводит к некоторому снижению характеристик прочности (рис I5б), однако, при всех рассмотренных степенях деформации, прочность рекристаллизованного металла существенно превышает прочность исходного горячекатаного металла.

На рис. I6 приведен характерный график "нагрузка — деформация", полученный в процессе растяжения при  $20^\circ$  плоского образца, вырезанного в направлении прокатки из рекристаллизованного уранового листа. Скачкообразное циклическое изменение нагрузки в процессе испытания является признаком так называемого "авинного двойникования" и было отмечено для цинка и кадмия при комнатной температуре (4) и для меди при температуре  $4,2^\circ \text{K}$  (5). Приведенные данные наглядно свидетельствуют о том, что при комнатной температуре двойникование, как установлено Каном (1),

2P-40-60

- II -

является основным механизмом деформации урана. В процессе испытания таких образцов скачкообразное наложение нагрузки сопровождалось потрескиванием и ярким искрением.

Пластическая деформация и рекристаллизация заметно влияют на сопротивляемость урана ползучести. Результаты испытаний, проведенных при  $300^{\circ}$  и различных напряжениях (таблица 3), показывают, что наибольшую скорость ползучести в условиях опыта имел мелкозернистый рекристаллизованный уран.

Так, например, при напряжении равном  $22 \text{ кг}/\text{мм}^2$  скорость ползучести рекристаллизованного урана в 3-4 раза больше скорости ползучести урина, прокатанного при  $500^{\circ}$  с теми же степенями деформации и примерно в 5 раз больше, чем скорость ползучести исходного горячекатаного урана. При этом следует отметить большую деформацию рекристаллизованного урана в период неустановившейся ползучести (см.рис. I7).

Сопротивляемость ползучести рекристаллизованного урана зависит также от степени деформации при прокатке. Так, например, при  $300^{\circ}$  и напряжении  $22 \text{ кг}/\text{мм}^2$  для урана, деформированного на 15% и 50% и рекристаллизованного при  $600^{\circ}$  в течение 2-х часов, скорости ползучести равны  $4,2 \cdot 10^{-4} \text{ см}/\text{час}$  и  $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ см}/\text{час}$ , а остаточные деформации 1,55% и 3,05% соответственно. Рекристаллизованный уран имеет более низкую температуру начала ускоренной ползучести. Рассматривая зависимость суммарной деформации образцов за 500 часов испытания при напряжении  $22 \text{ кг}/\text{мм}^2$  от температуры, можно видеть, что ускоренная ползучесть рекристаллизованного урана наблюдается с  $225-275^{\circ}$ , в то время как для горячекатаного урана эта область расположена в температурном интервале  $300-350^{\circ}$ , а для закаленного урана при еще более высоких температурах. Эти данные представлены графически на рис. I8.

### 3. Анизотропия механических свойств рекристаллизованного урана.

Уран, в силу специфики строения кристаллической решетки  $\alpha$ -фазы, обладает ярко выраженной анизотропией физических и

Таблица 3.

Влияние степени деформации при прокатке в  $\alpha$ -области и напряжений, приложенных в процессе испытания, на ползучесть урана (температура испытания 300°C).

| Состояние;<br>термическая<br>обработка                                  | Напря-<br>жение 2<br>кг/дм <sup>2</sup> | Деформа-<br>ция в<br>помент<br>нагруже-<br>ния | Скорость<br>ползучести<br>$V$<br>% /час | Интервал<br>замера скло-<br>нности пол-<br>зучести |     |      |      | Суммарная де-<br>формация<br>вме-<br>сте:<br>за<br>(час) ( час ) $\varepsilon$ % |
|---|---|--|---|--|-----|------|------|--|
|   |   |  |   | 2  | 3   | 4    | 5    |  |
| Исходный го-<br>ричекатанный<br>уран                                    | 15                                      | 0,25   | $3,6 \cdot 10^{-5}$                     | 200-475  | 475 | 0,33 | 0,33 | Образец<br>не разор-<br>вался.   |
|   | 18                                      | 0,45   | $7,0 \cdot 10^{-5}$                     | 100-475  | 475 | 0,59 | —    |  |
|   | 22                                      | 1,19   | $2,3 \cdot 10^{-4}$                     | 100-455  | 460 | 1,72 | —    |  |
| Уран, прокатан-<br>ный при 500<br>состепеню<br>деформации<br>равной 45% | 15                                      | 0,12   | $1,0 \cdot 10^{-4}$                     | 100-500  | 500 | 0,30 | —    | —  |
|   | 18                                      | 0,18   | $1,4 \cdot 10^{-4}$                     | 210-540  | 540 | 0,45 | —    |  |
|   | 22                                      | 0,20   | $2,5 \cdot 10^{-4}$                     | 100-540  | 540 | 0,55 | —    |  |

2940-60

Прил.табл. 3

|   | 1  | 2    | 3                   | 4       | 5   | 6    | 7                        | 8  |
|---|----|------|---------------------|---------|-----|------|--------------------------|----|
| To же + отходы при 600 в                                    | 15 | 0,18 | $9,7 \cdot 10^{-5}$ | 160-550 | 550 | 0,36 | Сбрасывая не разрешается | -" |
| течение 2-х часов   | 18 | 0,20 | $5,1 \cdot 10^{-4}$ | 330-550 | 550 | 0,97 | "                        | "  |
|   | 22 | 0,56 | $1,9 \cdot 10^{-3}$ | 400-550 | 550 | 3,58 | "                        | "  |
| Уран, прокатанный при 500 со степенью обогащения равной 60% | 15 | 0,15 | $1,8 \cdot 10^{-4}$ | 200-475 | 475 | 0,35 | -"                       | -" |
|   | 18 | 0,19 | $2,9 \cdot 10^{-4}$ | 200-500 | 500 | 0,57 | -"                       | -" |
|   | 22 | 0,22 | $4,0 \cdot 10^{-4}$ | 200-460 | 500 | 0,67 | -"                       | -" |
| To же + отходы при 600 в течение 2-х часов                  | 15 | 0,18 | $1,4 \cdot 10^{-4}$ | 220-455 | 460 | 0,47 | -"                       | -" |
|   | 18 | 0,24 | $4,0 \cdot 10^{-4}$ | 200-455 | 460 | 0,79 | "                        | "  |
|   | 22 | 0,54 | $1,2 \cdot 10^{-3}$ | 320-455 | 460 | 3,00 | -"                       | -" |

- I4 -

механических свойств, которая особенно заметно проявляется после деформации в  $\alpha$  - области, вследствие возникновения текстуры.

На рис.I9 показано изменение предела прочности при растяжении для листового урана в зависимости от направления вырезки образцов. Образцы, вырезанные в направлении прокатки, имели на 30% больший предел прочности, чем образцы, вырезанные в перпендикулярном направлении. После рекристаллизационного отжига различие в значениях пределов прочности составляло 15%, т.е. такая термическая обработка не ликвидирует анизотропию механических свойств текстурированного урана

Характерно, что в случае деформации текстурированного урана методом осаживания, соотношение значений предела прочности в зависимости от направления вырезки образцов обратно тому, которое имеет место при деформации растяжением. В случае осаживания прочность образцов, вырезанных вдоль направления прокатки меньше, чем прочность образцов вырезанных в перпендикулярном направлении.

Эти результаты могут быть связаны с представлениями Кана о существовании в уране направлений затрудненной деформации(I).

Как было отмечено выше, изделия из литого или горячекатаного урана, в силу специфики строения и свойств  $\alpha$  - фазы, подвержены формоизменению под воздействием облучения и при циклической термической обработке. При наличие текстуры это формоизменение становится направленным.

Результаты исследований показали, что изменяя степень квантизации издеий и механические свойства путем применения различных видов закалки, деформации и отжига при температурах  $\alpha$  - области, можно в широком диапазоне регулировать формоизменение изделий из урана под действием указанных факторов.

2849-66

- 15 -

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Закалка урана из областей  $\beta$  - и  $\gamma$  - фаз, приводя к измельчению зерна, повышает квазизотропию изделий при однократенном повышении предела прочности (до 60%).

Закалка урана в несколько раз увеличивает его сопротивляемость ползучести при температурах меньших  $400^{\circ}$  и уменьшает ее при более высоких температурах  $\alpha$  - области.

Деформация, даже после последующего рекристаллизационного отжига в температурном диапазоне  $\alpha$  - области, приводит к возникновению в уране текстуры, резкому измельчению зерна (при степенях деформации 30-40% и выше) и повышению прочности в области температур  $\alpha$  - фазы.

Указанная обработка значительно снижает сопротивляемость урана ползучести при температурах, превышающих  $300^{\circ}$ .

Применение термической обработки (закалки) и деформации с последующим рекристаллизационным отжигом позволяет в широких пределах изменять структуру и механические свойства урана.

- 16 -

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Cahn R.W., "Plastic Deformation of Alpha-Uranium Twinning and Slip". Acta Met., 1, 149, (1953).

2. Nichols R.W., "Uranium and its Alloys". Nuclear Engineering, 2, (18) 355 (1957).

3. Foot Frank G., "Physical Metallurgy of Uranium".

Доклад № 555. Материалы Международной конференции 1955 г. по мирному использованию ядерной энергии.

4. Борретт Ч.С., "Структура металлов". Металлургиздат 1948 г.

5. Blewitt T.H., Coltman R.R., and Redman J.K., "Low - Temperature Deformation of Copper Single Crystals". Journal of Applied Physics, 28, (6) 651 (1957).

-17-

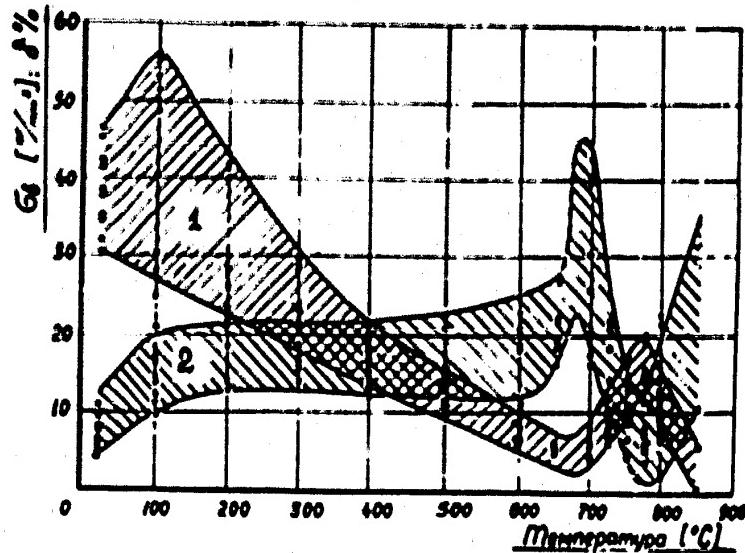


Рис I. Влияние температуры на механические свойства горячекатаного урана.

Испытания проведены в атмосфере аргона. Содержание основных примесей в уране исследованных плавок:

$$\text{Zr} = 5 \cdot 10^{-8} + 3 \cdot 10^{-2}\%;$$

$$\text{Si} = 2 \cdot 10^{-3} + 4 \cdot 10^{-2}\%;$$

$$\text{C} = 0,01 + 0,15\%$$

I - предел прочности  $[\sigma_0]$

2 - относительное удлинение.  $[\delta]$

- 183 -

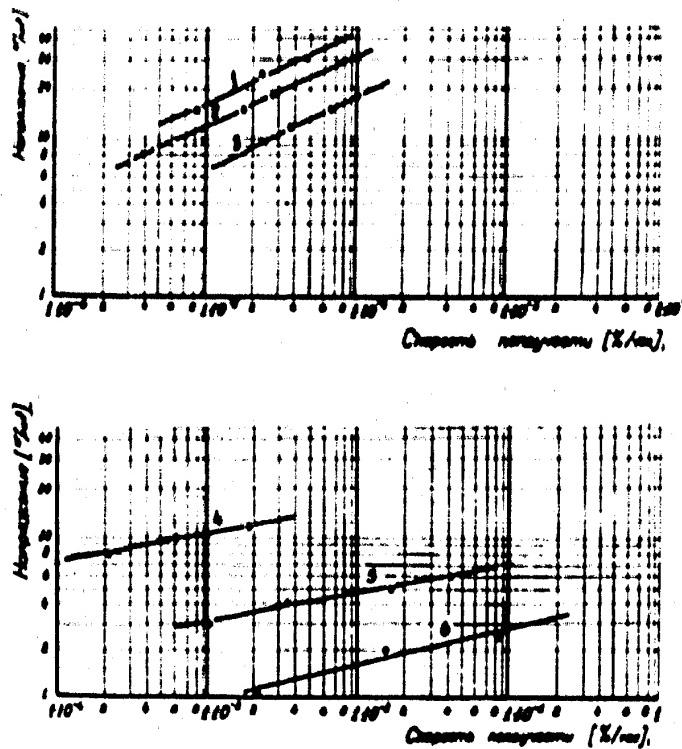
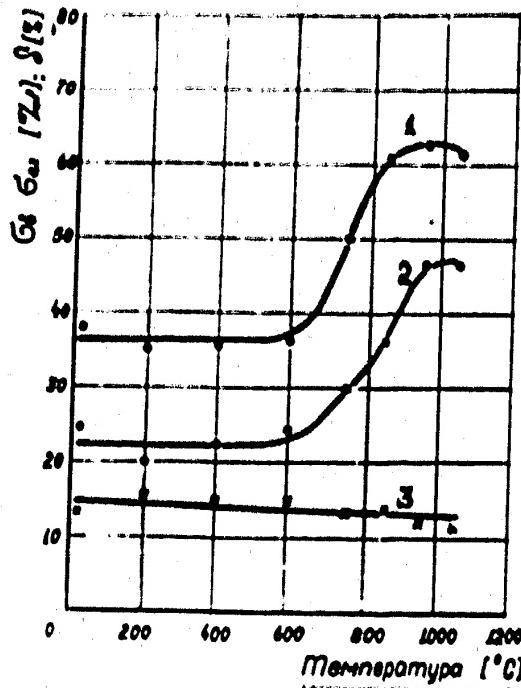


Рис 2. Изменение скорости ползучести горячекатаного урана в зависимости от температуры и напряжения.  
Содержание основных примесей в уране:  $\text{Fe} = 4,8 \cdot 10^{-8}\%$ ;  $\text{Si} = 1,4 \cdot 10^{-8}\%$ ;  $\text{Mn} = 1,8 \cdot 10^{-4}\%$ ;  $\text{C} = 0,01\%$

|     |                       |   |     |
|-----|-----------------------|---|-----|
| 1 - | температура испытания | - | 20  |
| 2 - | "                     | - | 200 |
| 3 - | "                     | - | 300 |
| 4 - | "                     | - | 400 |
| 5 - | "                     | - | 500 |
| 6 - | "                     | - | 600 |

60-0116

-10-



**Рис 3.** Изменение механических свойств горячекатаного урана в зависимости от температуры закалки. Продолжительность выдержки перед закалкой -80 минут; охлаждение в масле.

Содержание основных примесей в уране:

$$\text{Zr} = 7 \cdot 10^{-8}\%;$$

$$\text{Si} = 1,2 \cdot 10^{-8}\%;$$

$$\text{C} = 0,04\%$$

1 -предел прочности -  $\sigma_y [\text{kg/mm}^2]$

2 -условный предел текучести -  $\sigma_{ut} [\text{kg/mm}^2]$

3 -относительное удлинение -  $\delta [\%]$

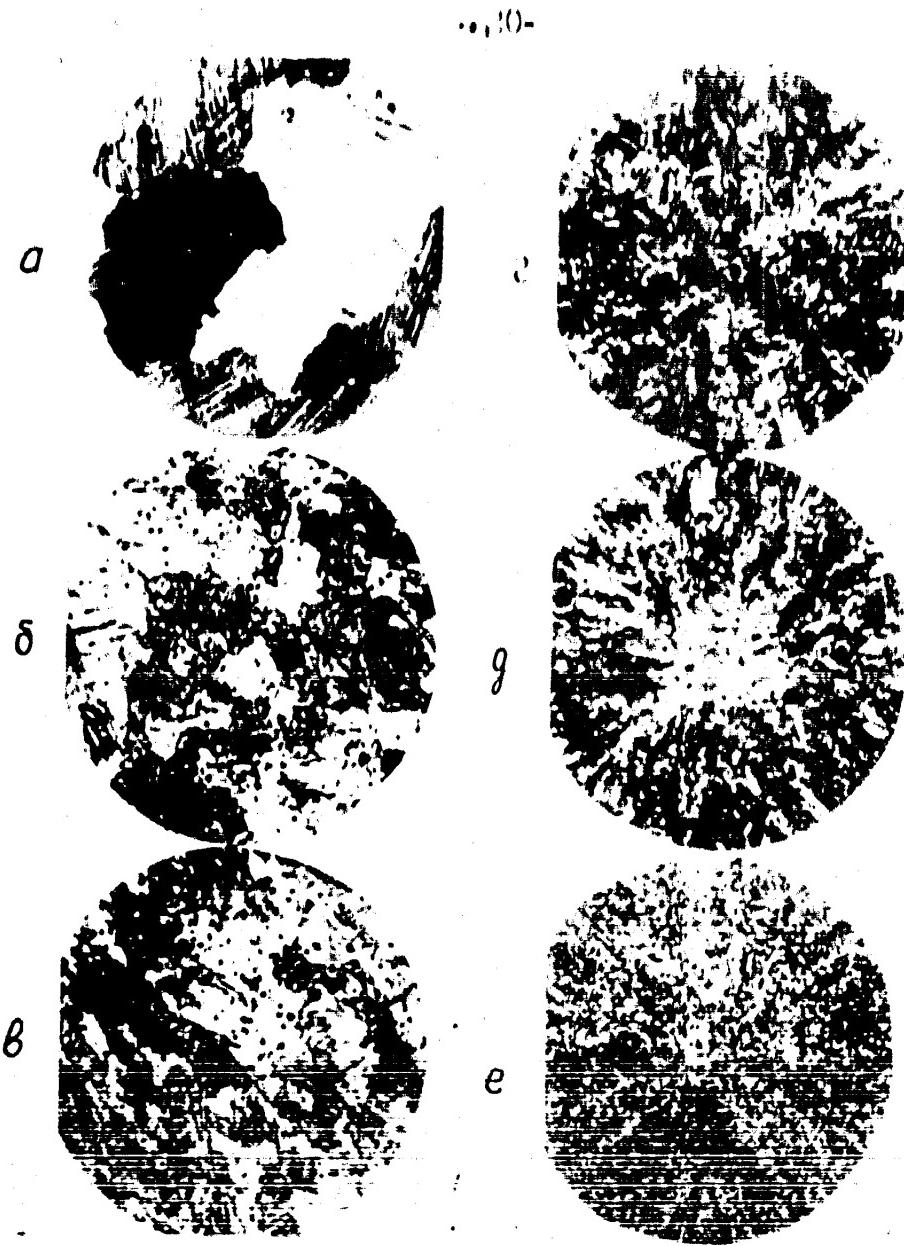


Рис - 4. Изменение структуры урана при закалке.

а- микроструктура литого урана. Суммарное содержание железа, кремния и алюминия  $1,5 \cdot 10^{-2}\%$   $\times 70$ .

б- микроструктура закаленного из  $\gamma$ -фазы урана. Суммарное содержание железа, кремния и алюминия  $5,10^{-2}\%$   $\times 135$ .

в- микроструктура закаленного из  $\gamma$ -фазы урана. Суммарное содержание железа, кремния и алюминия  $1,10^{-1}$   $\times 135$ .

г; д; е- микроструктуры образцов а, б и в соответственно  $\times 2$ .

2849-60

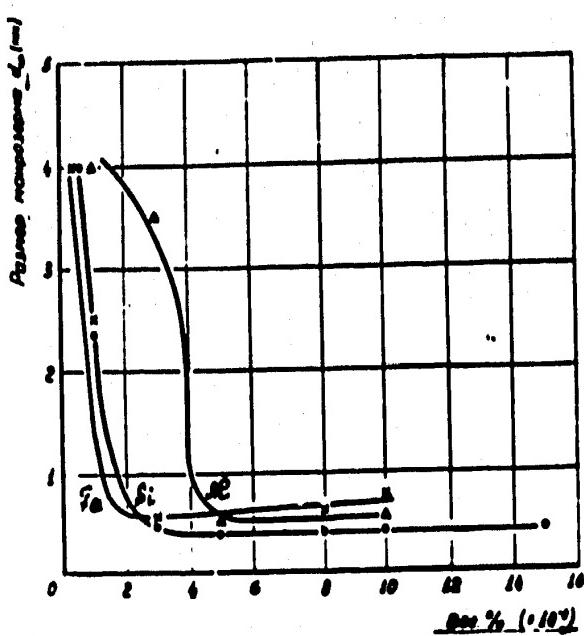


Рис 5. Влияние содержания железа, кремния и алюминия в уране на величину максимума.

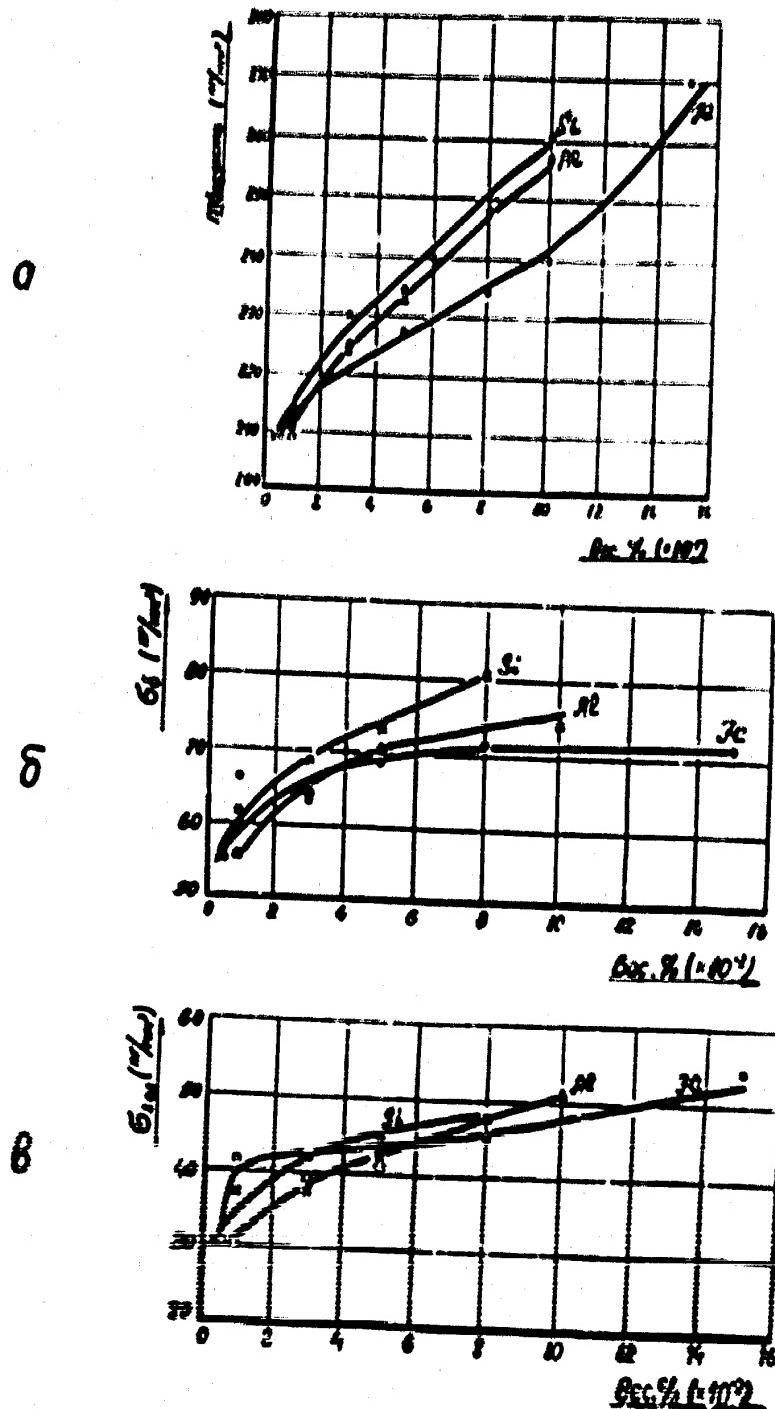


Рис. 6. Влияние содержания железа, кремния и алюминия в уране на твердость (а), предел прочности (б) и предел текучести (в). Температура испытания 200°С.

29-66440

-23-

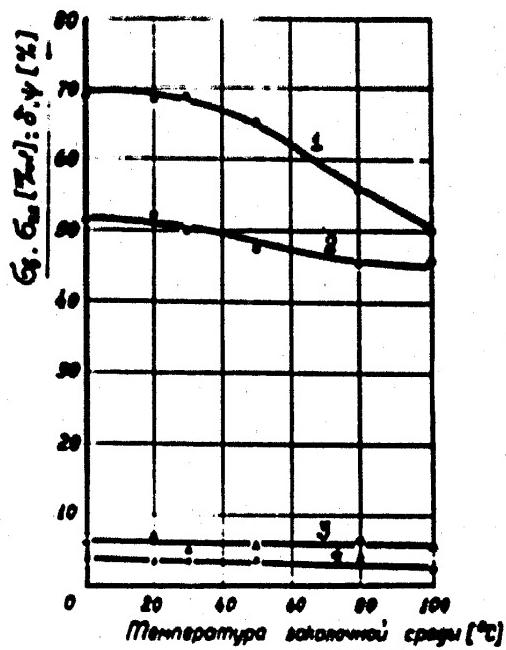


Рис. 7. Влияние температуры закалочной среды на механические свойства литого урана, закаленного с 850° в воду.

(Выдержка 30 минут)

1- предел прочности -  $\sigma_s$  [ $\text{kg/mm}^2$ ]

2- условный предел текучести -  $\sigma_{0.2}$  [ $\text{kg/mm}^2$ ]

3- относительное удлинение -  $\delta [\%]$

4- относительное сужение площади поперечного сечения -  $\psi [\%]$

-24-

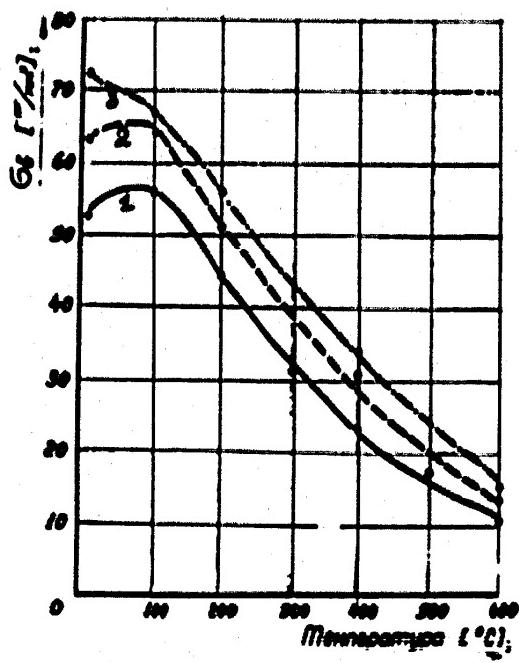


Рис 8. Изменение предела прочности литого и закаленного урана в зависимости от температуры испытания (исталл одной плавки).

- 1- уран литой
- 2- уран, закаленный из  $\beta$ -фазы
- 3- уран, закаленный из  $\gamma$ -фазы

2949-60

-25-

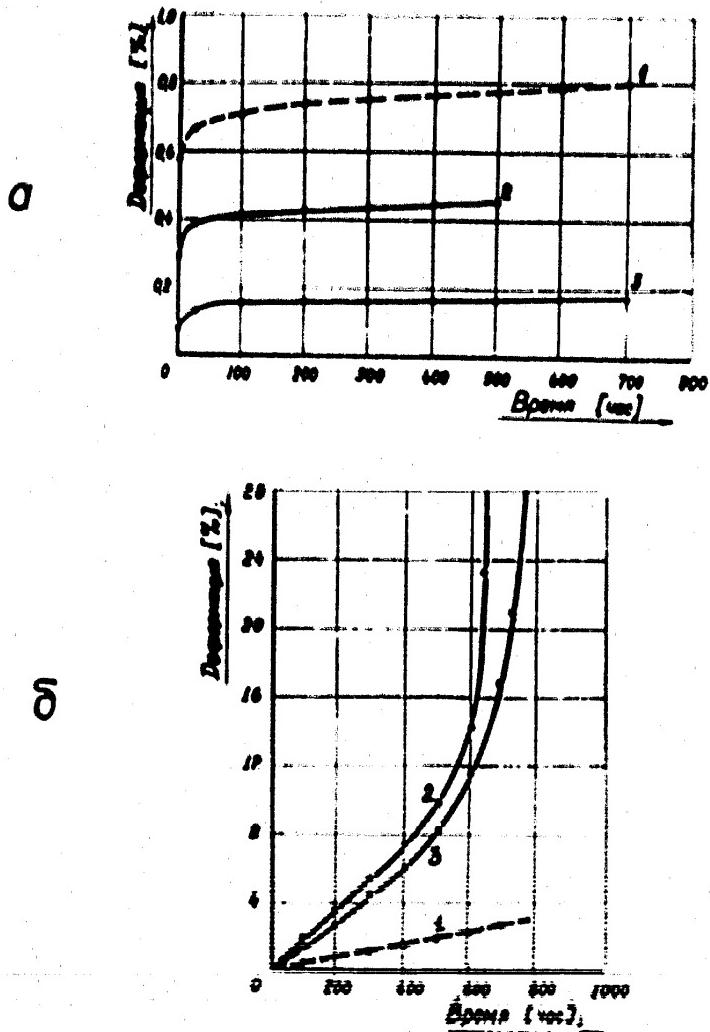


Рис 9. Первичные кривые ползучести для горячекатаного и горячекатаного закаленного урана:

а) Температура испытания  $300^{\circ}$

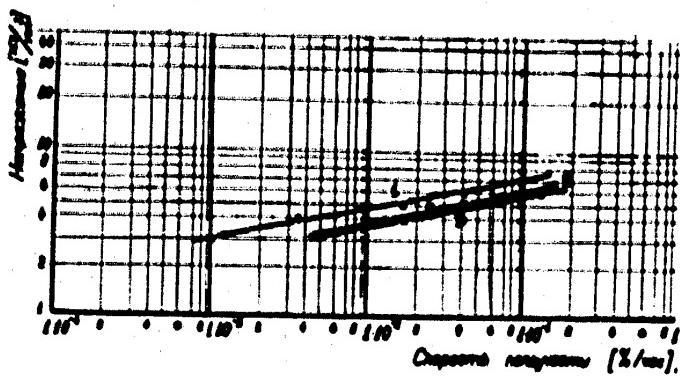
1- уран горячекатанный  $\sigma = 18 \text{ кг}/\text{м}^2$       б) Температура испытания  $300^{\circ}$ ,  
 $\sigma = 18 \text{ кг}/\text{м}^2$

2- уран, закаленный из  $\beta$ -фазы      1- уран горячекатанный

$\sigma = 20 \text{ кг}/\text{м}^2$       2- уран, закаленный из  $\beta$ -фазы

3- уран, закаленный из  $\gamma$ -фазы  
 $\sigma = 18 \text{ кг}/\text{м}^2$

-26-



**Рис 10.** Изменение скорости ползучести для горячекатаного и горячекатаного закаленного урана.  
 Содержание примесей:  $\text{Je} = 4,8 \cdot 10^{-3}\%$ ;  $\text{Si} = 1,4 \cdot 10^{-3}\%$ ;  $\text{C} = 0,01\%$   
 1- уран горячекатанный  
 2- уран, закаленный из  $\beta$ -фазы  
 3- уран, закаленный из  $\gamma$ -фазы

-27-

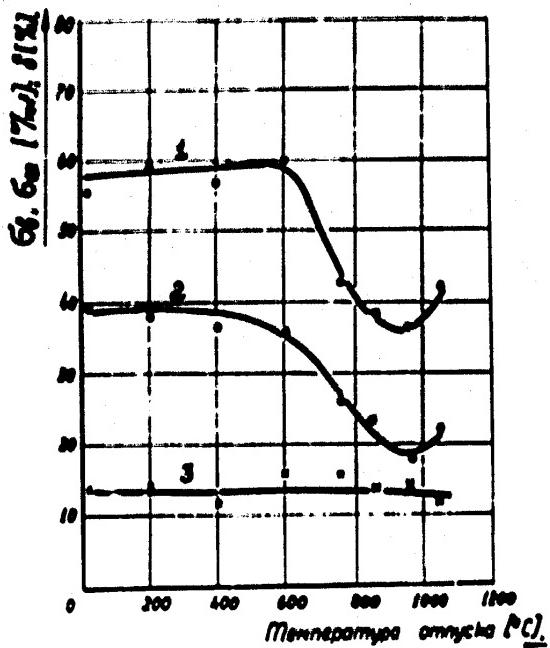


Рис II. Изменение механических свойств урана, закаленного из  $\gamma$ -фазы в зависимости от температуры отпуска.

(Нагрев до  $850^{\circ}$ ; выдержка 30 мин; охлаждение в масле; отпуск при указанных температурах в течение 30 минут.

(Испытания проведены при  $20^{\circ}$ )

I - предел прочности -  $\sigma_0$  [ $\text{kg/mm}^2$ ]  
 2 - условный предел текучести -  $\sigma_{0.2}$  [ $\text{kg/mm}^2$ ]  
 3 - относительное удлинение -  $\delta [\%]$

-26-

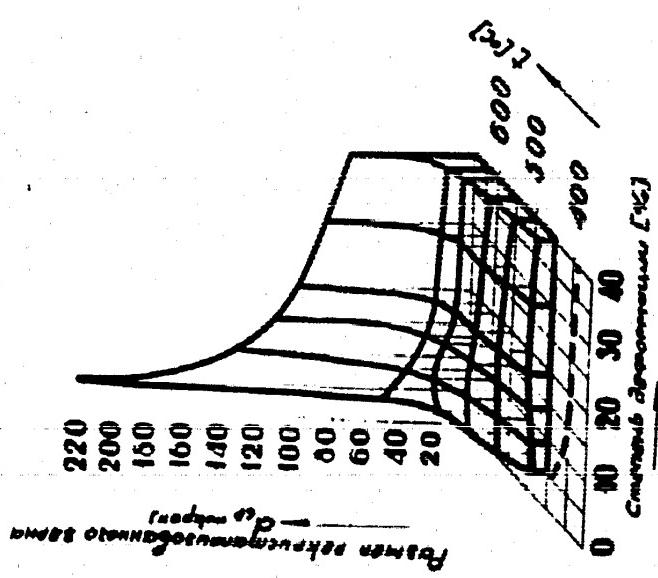


Рис. 12. Приближенная диаграмма рекристаллизации урана. (Горячекатанный уран, деформация путем прокатки при изотермии температуре; прокатка - 10 часов).

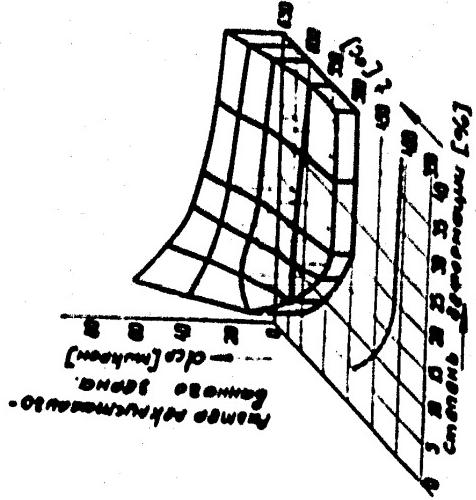


Диаграмма химия соответствует порогу рекристаллизации, определенному методом рентгенографического анализа.

2849-60

2449-60

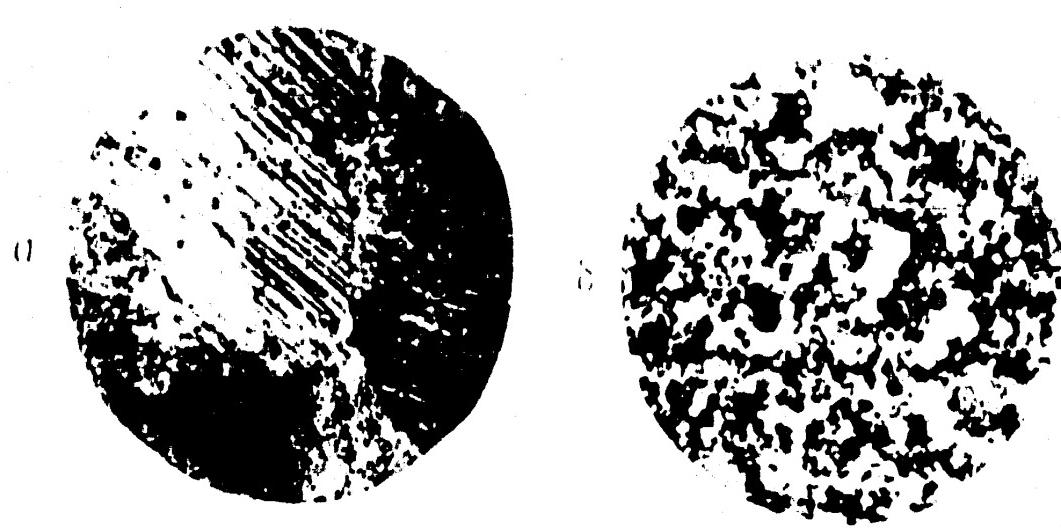


Рис I4. Изменение структуры урана после деформации и отжига при температурах  $\alpha\beta$ - области:

а) исходный горячекатанный уран  
 $x70$

б) уран, прокатанный при  $400^{\circ}$   
со степенью деформации 60% и отожженный при  $600^{\circ}$  в течение 2-х часов  
 $x200$

-31-

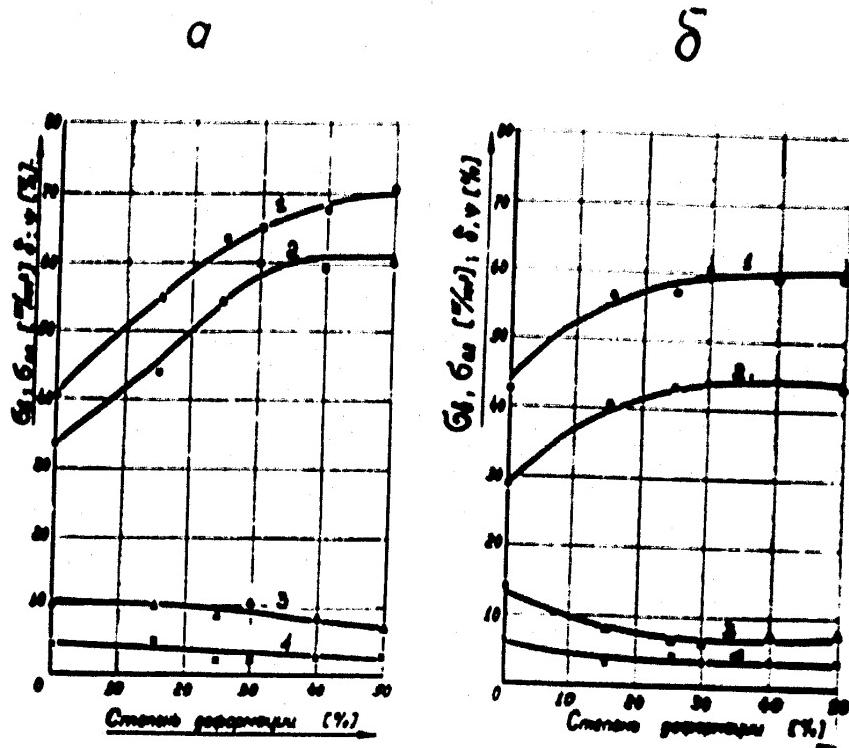


Рис 15. Изменение механических свойств урана в зависимости от степени деформации при прокатке. (Уран прокатан при 500°; образцы вырезаны из прутков в направлении прокатки).

- а) без отжига
- б) после отжига при 600° в течение 2-х часов
- 1- предел прочности -  $\sigma_0.5$  [ $\text{kg}/\text{mm}^2$ ]
- 2- условный предел текучести-  $\sigma_{u0.2}$  [ $\text{kg}/\text{mm}^2$ ]
- 3- относительное удлинение -  $\delta$  [%]
- 4- относительное сужение площади поперечного сечения -  $\psi$  [%]

-31-

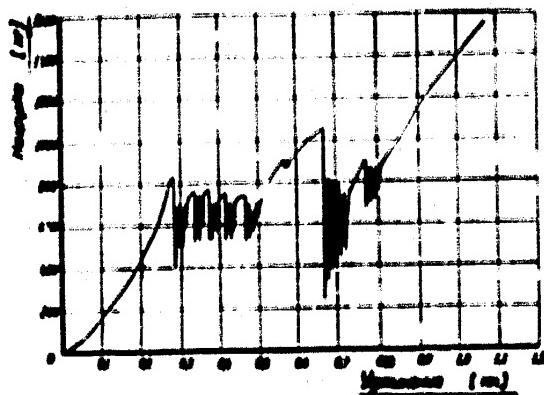


Рис I6. Кривая "нагрузка-деформация" для лигированного рекристаллизованного урана.

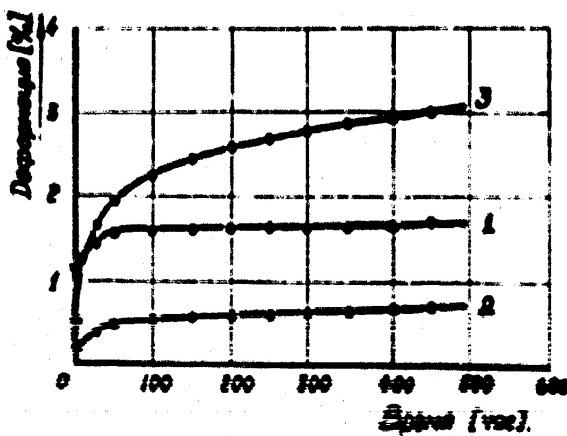


Рис I7. Влияние режима обработки в области ползучести на сопротивляемость урана ползучести при  $800^{\circ}$   $\sigma = 22 \text{ кг}/\text{мм}^2$   
 1-й уран горячекатанный  
 2-й уран, прокатанный в области со степенью деформации 60%  
 3-й уран, прокатанный в области со степенью деформации 60% и отожженный при  $600^{\circ}$  в течение 2-х часов

-32-

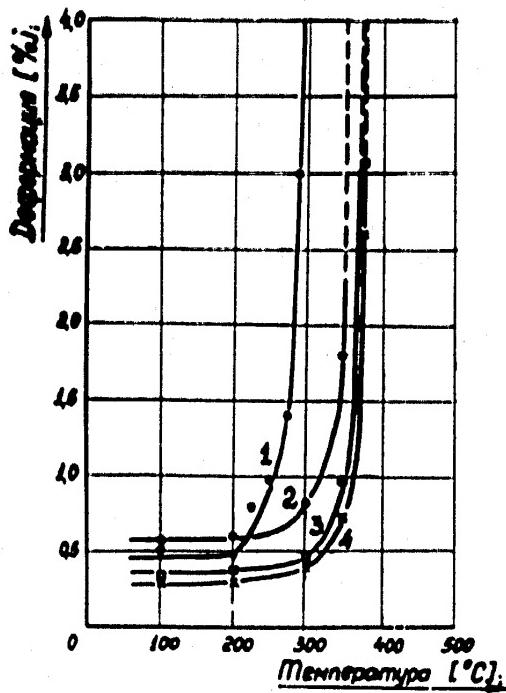


Рис 18. Изменение температурного интервала начала ускоренной ползучести урана в зависимости от состояния. (Деформация за 500 часов испытания при напряжении равном  $22 \text{ кг}/\text{мм}^2$ ).  
 1- рекристаллизованный уран  
 2- горячекатаный уран  
 3- уран, закаленный в воду из  $\beta$ -области  
 4- уран, закаленный в воду из  $\gamma$ -области.

2849-60

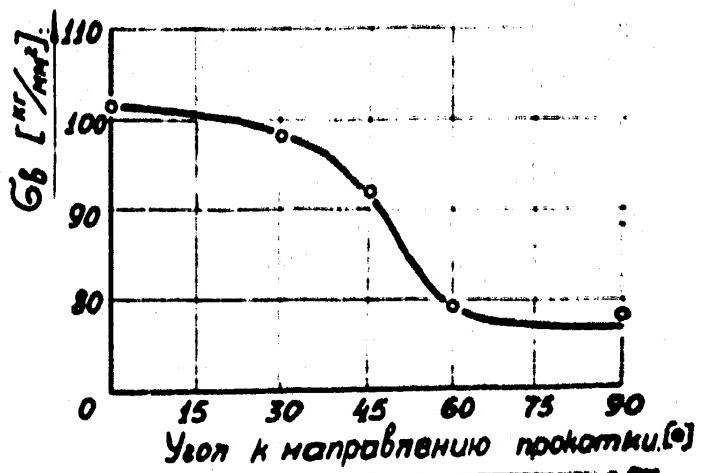


Рис I9. Изменение предела прочности при растяжении листового текстурированного урана в зависимости от направления вырезки образцов. (Прокатка при  $200^{\circ}$  со степенью деформации 60%; рекристаллизационный отжиг при  $600^{\circ}$  - 2 ч).